第41卷 第1期
2024年1月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 41 No. 1
Jan. 2024

青海省多年地表感热通量的时空变化特征

孙 宽[1]， 孙雪岩[2]， 唐 艳[1]， 张亚玲[3]， 刘富刚[1]，
范克胜[1]， 杨子琼[2]， 屈志强[2]

（1. 德州学院生态与资源环境学院，山东 德州 253023；2. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院，内蒙古农业大学草地资源教育部重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010011；3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司，天津 300222）

摘 要：选取青海省35个气象站观测数据，基于CHEN-WENG感热系数方案，计算了1980—2017年青海省地表感热通量。利用小波分析、Mann-Kendall突变检验和经验正交函数法（Empirical Orthogonal Function，EOF），对感热通量的时空变化特征及其影响因子进行分析。结果表明：（1）1980年以来，青海省全年和各季节感热通量总体上均呈上升趋势，并具有28 a的主周期和约18 a的副周期，冬季的周期变化较为复杂；（2）全年和各季节感热通量与地气温差存在显著相关性，2004—2017年受地气温差增大的影响上升；（3）全年、春季和秋季感热通量与风速存在显著相关性，1980—2004年受风速减小的影响感热通量下降；（4）夏季降水与感热通量呈显著负相关；（5）从空间上看，全年以及春季感热通量呈现出显著的东西分异，秋、冬季表现出一定程度的南北分异。

关键词：感热通量；EOF分析；M-K检验；小波分析；青海省

青藏高原平均海拔超过4000 m，是世界上海拔最高的地貌单元。与北半球大陆同纬度其他地区相比，青藏高原是一个强大热源[1]，其热力作用通过环流进一步改变了对流层中部的大气环境状况，进而加强了亚洲季风作用，并对中国乃至东亚地区的降水格局产生显著的影响[2]。地面通过长波辐射、湍流交换及潜热交换等过程与大气进行热量交换[3]，其中地表感热是青藏高原热力作用的主要分量[4]。上世纪七十年代以来，青藏高原地表热通量一直是国内外众多学者的研究对象[5-6]。青藏高原地表感热通量对我国长江中下游等地区的降水异常、亚洲大气环流乃至全球气候变化有重要意义[7-8]。

地表感热通量可根据整体输送法计算[9]，其关键是热力交换系数（C_H）的选取。C_H必须通过参数化得到，其参数化方案主要有三种：即常数[10]，CHEN-WENG方案[11]和Yang方案[12]。叶笃正等[10,13]基于Cressman等的观点，认为青藏高原C_H在0.006~0.01，取平均值为0.008；陈万隆和翁笃鸣[11]参考TIPMEX结果，在干旱时段蒸发等于降水的前提下，根据地表能量平衡反解地表感热通量[14]得出基于风速函数的参数化方案（CHEN-WENG方案）。Yang等[12]基于微气象学，发展了C_H参数化的物理方法（Yang方案）。

以上研究取得了长足进步，但多局限于青藏高原整体或高原中、东部，少有以省域尺度对青藏高原感热通量进行研究，且由于研究方法、研究资料和时段的差异，地表感热通量的研究结果呈现出一定的不确定性。竺夏英等[15]发现使用不同资料测算的感热通量有较大差异；Guo等[16]利用物理方法计算了1981—2006年的青藏高原感热通量，发现其呈下降趋势；Zhu等[17]基于NCEP/DOE再分析数据，在近期全球变暖间歇的背景下，得出了青藏高原感热通量在1998—2015年恢复上升的结论。

本文基于CHEN-WENG方案计算了地表感热通量并分析其变化特征，探讨青藏高原感热时空演变特征及其影响因子，以期为揭示青藏高原感热变化趋势、深化感热影响机制提供数据支持。这有助于改善青海省短期气候预报能力与气候变化研究，也为制定区域农牧业发展政策、合理调整生产布局

收稿日期：2023-03-30； **修订日期**：2023-05-16
基金项目：国家自然科学基金项目（31960361）；内蒙古自然科学基金项目（2022MS04010）
作者简介：孙宽（2001-），男，主要从事干旱区土地沙化研究. E-mail: sunkuan0627@163.com
通讯作者：屈志强. E-mail: qzqimau@163.com

提供理论依据。

1　数据与方法

1.1　数据来源

青海省(31°36′~39°19′N,89°35′~103°04′E)位于青藏高原东北部,是青藏高原核心区域之一,由三江源地区、柴达木盆地、青海湖、河湟谷地和祁连山五大亚区组成。本研究气象数据从中国气象局获取青海省35个代表性气象站点的逐日气象数据(图1),包括10 m风速、地表温度、2 m气温、降水以及日照时数等,时间尺度为1980—2017年。

1.2　地表感热通量计算方法

由于CMA提供的数据时间分辨率低,无法使用Yang方案;而陈万隆等[11]的方案思考了风速对感热交换的影响,故使用CHEN-WENG方案计算地表感热通量,公式如下:

$$H=\rho C_P C_H V\left(T_g-T_a\right) \tag{1}$$

$$C_H=\begin{cases}0.00112+\dfrac{0.01}{v}, & Z>2800\\ 0.00112+\dfrac{0.01}{v}-0.00362\times\dfrac{P-720}{280}, & Z\leqslant 2800\end{cases} \tag{2}$$

式中:H为地表感热通量(W·m^{-2});ρ为干空气密度(g·cm^{-3}),取0.85;C_P为干空气的定压比热(J·kg^{-1}·K^{-1}),取1004;V为地面10 m风速(m·s^{-1})(以下简称风速);T_g、T_a分别为地表温度、2 m气温(℃);P为站点气压(hPa);Z为站点海拔(m)。

1.3　分析方法

使用小波分析、Mann-Kendall(M-K)突变检验、EOF分解以及回归分析、相关分析等方法进行研究。

小波分析是在傅里叶变换的基础上引入小波函数,具有时-频多分辨率分析功能[18],被广泛应用于多时间尺度下的气候时间序列周期性研究。本文采用cmr小波母函数。小波变换公式如下[19]:

$$W_f(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{3}$$

式中:$W_f(a,b)$为小波变换系数;$\psi(t)$为小波母函数;a为时间尺度因子;b为时间位置因子。

M-K突变检验是一种非参数的统计检验法,且不要求数据服从正态分布,计算简单,应用性强,多用于时间序列的突变检验。公式如下[20]:

$$UF_k=\frac{S_k-E\left(S_k\right)}{\sqrt{\operatorname{var}\left(S_k\right)}} \tag{4}$$

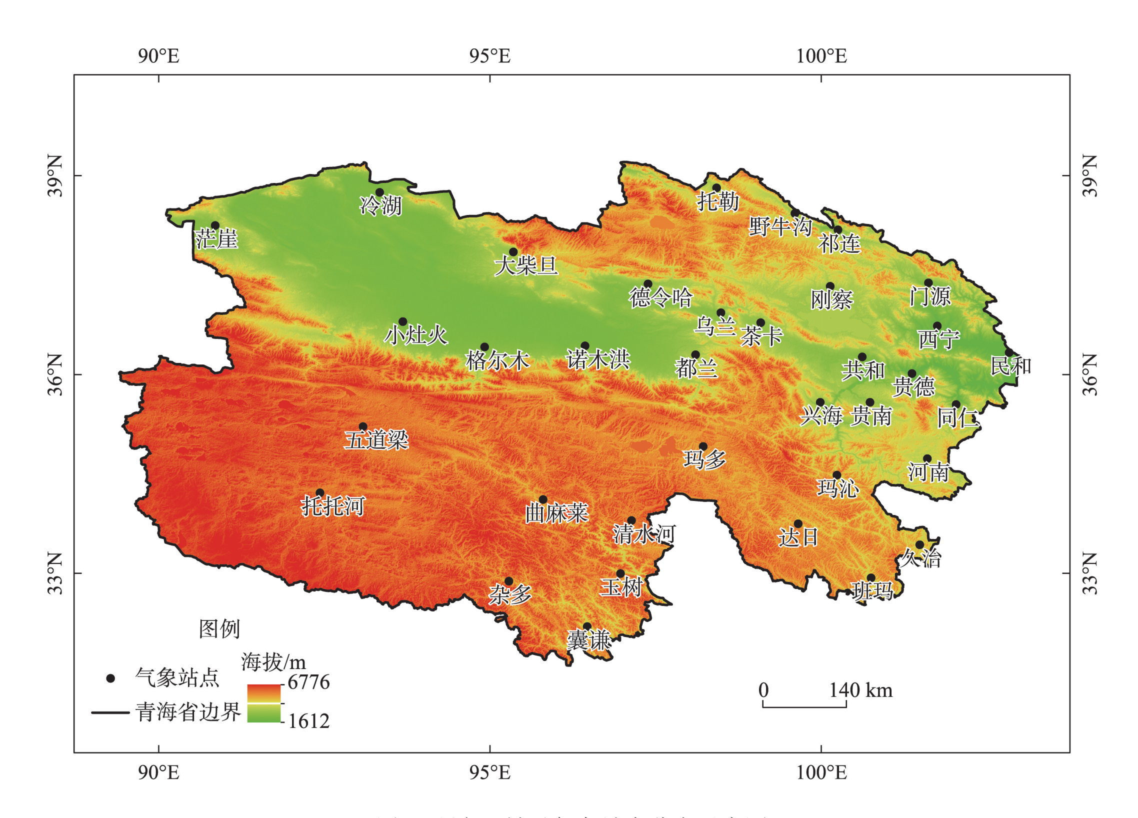


图1　研究区域及气象站点分布示意图

Fig. 1　Study area and the meteorological station distribution

式中：UF_k为定义统计量，UF_1=0；S_k为样本时间序列的秩序列的和；$E(S_k)$与$\mathrm{var}(S_k)$分别表示S_k的平均值和方差。

EOF分解能够将复杂的信息集中到少数时间序列和空间分布上，即将变量矩阵分解为时空函数，并且具有基本覆盖原变量场的优势。特征向量对应空间模态，主成分对应时间系数。公式如下[21]：

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^{m} v_{ik} t_{kj} \quad (5)$$

式中：x_{ij}表示第i个站点的第j次观测值；v_{ik}为空间函数；t_{kj}为时间函数。

2 结果与分析

2.1 青海省地表感热通量年代际和年际变化特征

1980—2017年青海省地表感热通量呈上升趋势。冬季感热通量变化最快，倾向率为0.19 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$；夏季感热通量变化最慢，倾向率为0.08 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$。1980—1999年，全年和季节年代际地表感热通量距平平均值均为负，其中1990—1999年有所减小。2000—2017年距平为正，其中，2010—2017年距平进一步增大，说明地表感热通量保持较高水平(表1，表2)。

从5 a滑动平均值来看，感热通量自1980年开始缓慢上升；1984—2001年呈下降趋势，1998年达到最低值，为32.27 W·m^{-2}；2001—2009年以0.73 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$的速率显著上升，2008年达到最大值，为41.57 W·m^{-2}；2010年以后略呈下降趋势(图2a)。各季节的年际变化情况和全年变化情况相似，其中春季(图2b)与全年变化趋势最相似。雷润芝等[22]的研究表明，不同时期全年和春季青藏高原地表感热通量的气候倾向率较为相似，这可能是因为地表风速、地气温差等对全年和春季地表感热通量具有相似的贡献率。夏季感热通量波动小，1980—2017年总体倾向率仅为0.08 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$(表2)；而冬季感热通量变化幅度较大，总体倾向率为0.19 W·m^{-2}·(10a)$^{-1}$。

2.2 青海省地表感热通量变化周期分析

青海省地表感热通量全年具有28 a的主周期和约18 a的副周期，分别对应约20 a和5 a的周期；2005年后出现约12 a的副周期和约5 a的周期(图3)。春、夏季的周期总体上与全年感热通量相似，都具有28 a的主周期、约18 a的副周期及约12 a的副周期(2005年后)，对应的周期也基本一致。但春季和夏季在约18 a的副周期尺度内所对应的周期不明显。秋季也具有28 a的主周期与12 a的副周期，对应约20 a和6~7 a的周期。冬季的周期变化情况较为复杂，存在28 a的主周期以及18 a、约12 a(2000年后)和6~9 a的副周期，分别对应18 a及12~

表1 青海省1980—2017年全年和季节地表感热通量年代际距平

Tab. 1 Interdecadal anomaly of annual and seasonal average land surface sensible heat fluxes in Qinghai Province from 1980 to 2017

/(W·m^{-2})

	1980—1989年	1990—1999年	2000—2009年	2010—2017年
全年	−1.90	−1.65	0.87	2.68
春季	−2.60	−1.20	1.27	2.53
夏季	−1.34	−0.66	1.05	0.95
秋季	−1.84	−1.87	0.46	3.25
冬季	−1.74	−2.49	0.59	3.63

表2 青海省1980—2017年全年和季节地表感热通量年代际变化倾向率

Tab. 2 Interdecadal tendency rate of annual average and seasonal average land surface sensible heat fluxes in Qinghai Province from 1980 to 2017

/[W·m^{-2}·(10a^{-1})]

	1980—1989年	1990—1999年	2000—2009年	2010—2017年	1980—2017年
全年	−0.05	−0.32	0.73	−0.14	0.16
春季	−0.21	−0.24	0.82	−0.30	0.18
夏季	−0.23	−0.26	0.07	−0.03	0.08
秋季	0.32	−0.42	0.92	−0.91	0.17
冬季	0.03	−0.17	0.87	−0.15	0.19

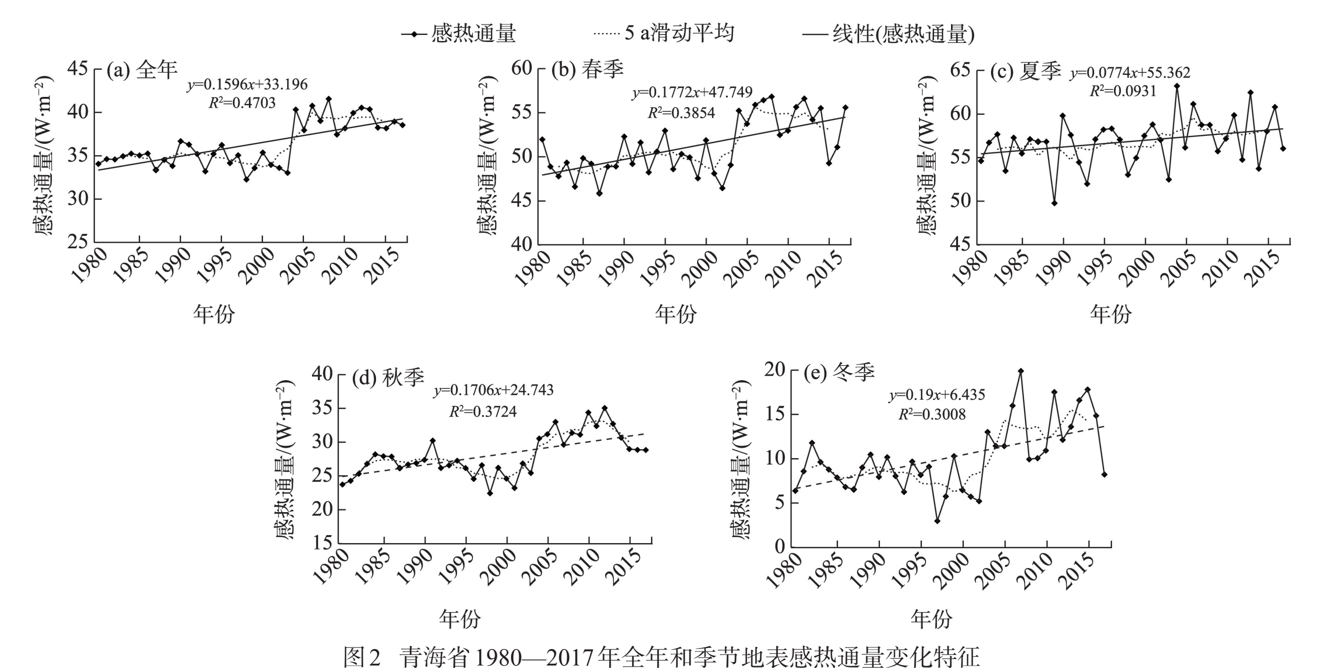


图2 青海省1980—2017年全年和季节地表感热通量变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of annual and seasonal average land surface sensible heat fluxes during the period from 1980 to 2017 in Qinghai Province

14 a、7 a、5 a的周期。周期对应了小波方差图上的3个极大值,具有明显的周期震荡。

2.3 青海省地表感热通量季节变化特征分析

对1980—2017年青海省感热通量年际变化和季节变化进行M-K突变检验。结果显示,在置信区间内,感热通量年际变化的突变点发生在2004年,2004年以前感热通量呈下降趋势;从2005年开始转变为上升趋势。其中,感热通量的下降趋势在2003年达到最大,此后呈上升趋势,到2005年完全变为增长趋势,并在2010年增长趋势达到95%的显著性水平(图4)。研究表明,青藏高原感热通量在2000年左右发生突变,改变了自上世纪80年代的下降趋势,并开始逐渐增加[23]。其原因是在全球变暖背景下,T_g与T_a显著上升;且由于热力性质的不同,T_g的上升速度大于T_a,因此地气温差自2000年开始快速增加(图6a),这成为感热通量转折并增加的主要驱动力[24]。

四季感热通量依次为夏季(56.87 W·m^{-2})>春季(51.20 W·m^{-2})>秋季(28.07 W·m^{-2})>冬季(10.14 W·m^{-2})。各季节感热通量多年平均值差异较大,变化趋势相似(图2),这也符合M-K突变检验。秋季和冬季在1996—2005年呈下降趋势,但冬季下降程度显著大于秋季。2004年发生突变后,各个季节感热通量都在上升,但夏季上升最缓慢,其余三个季节的上升趋势大致相当,2010年前后上升趋势显著性水平都超过了95%。这表明,在2005年后感热通量的增长主要在春季、秋季和冬季。

2.4 青海省地表感热通量空间变化特征分析

EOF分解可将原时空场信息集中到分解的前若干个模态上,每个模态对应载荷向量(特征向量)与主成分,分别表示空间和时间性质。而当前几个模态的累计方差贡献率达到一定水平即可反映时空变化特征[21]。本研究中,前三个模态通过了显著性检验,累计方差贡献率为62.13%(表3)。图5为表3模态对应的载荷向量与时间系数。

第一模态载荷向量(图5a)表明青海省整体感热通量呈上升状态,只有北部少数站点呈下降趋势。从时间系数(图5d)看,以2004年为界,2004年以前青海省绝大部分站点时间系数为负,处于相对稳定的负相位状态,感热通量呈下降趋势,西北部和北部少数站点呈相反的变化趋势;2004年后,时间系数开始转变为正,振幅逐渐增加至2008年,说明2004—2008年青海省整体感热通量呈上升趋势,2008—2010年上升趋势趋缓,2010年后又有所增加,最终趋向稳定。这与M-K突变分析和小波分析的结果一致。

第二模态载荷向量(图5b)显示了青海省中南部和东北部以及西部感热通量变化呈反相位;中南

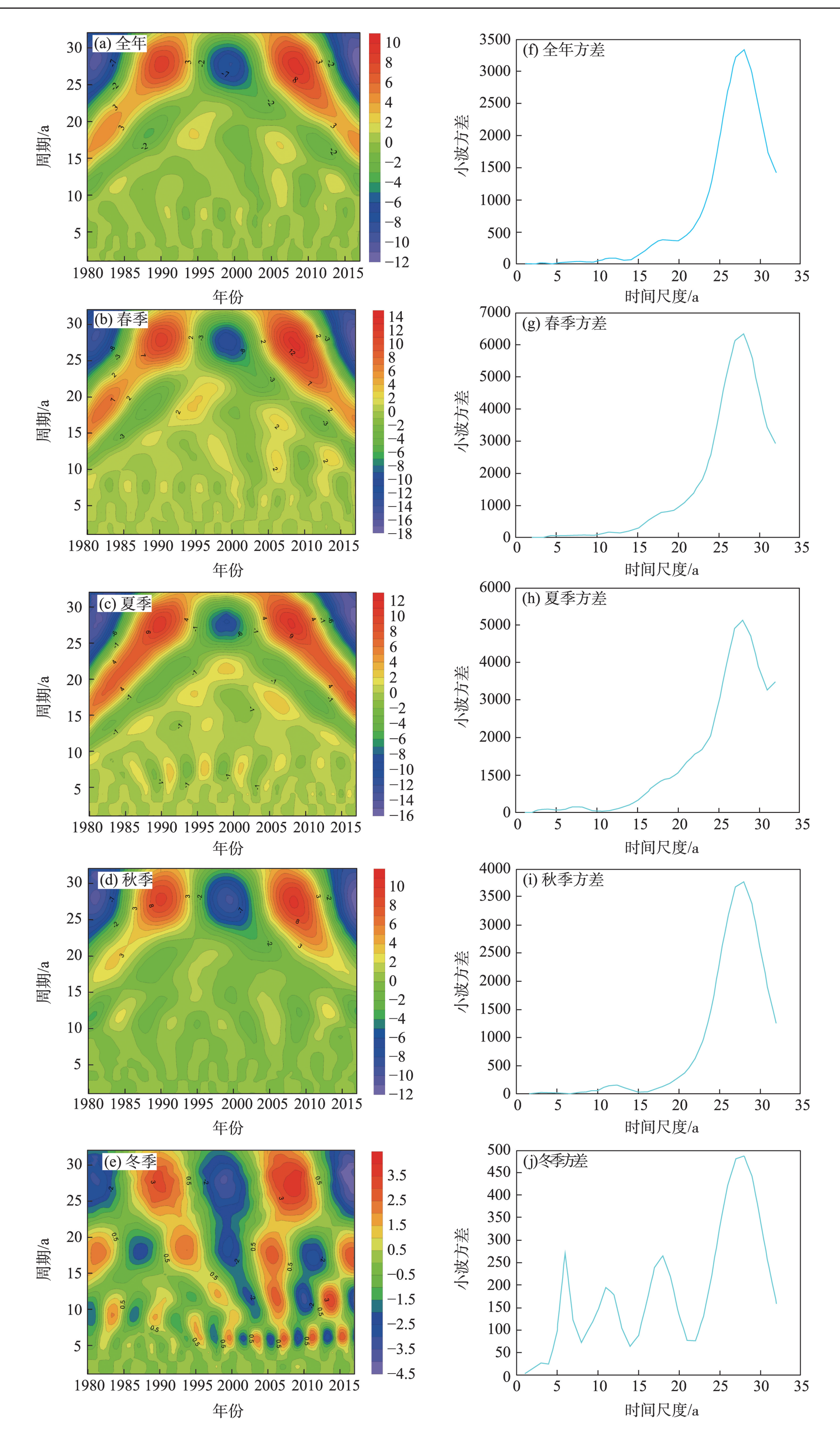


图3 青海省1980—2017年全年和季节地表感热通量小波系数实部等值线和方差

Fig. 3 Wavelet coefficient real contour and variance map of annual and seasonal average land surface sensible heat fluxes in Qinghai Province from 1980 to 2017

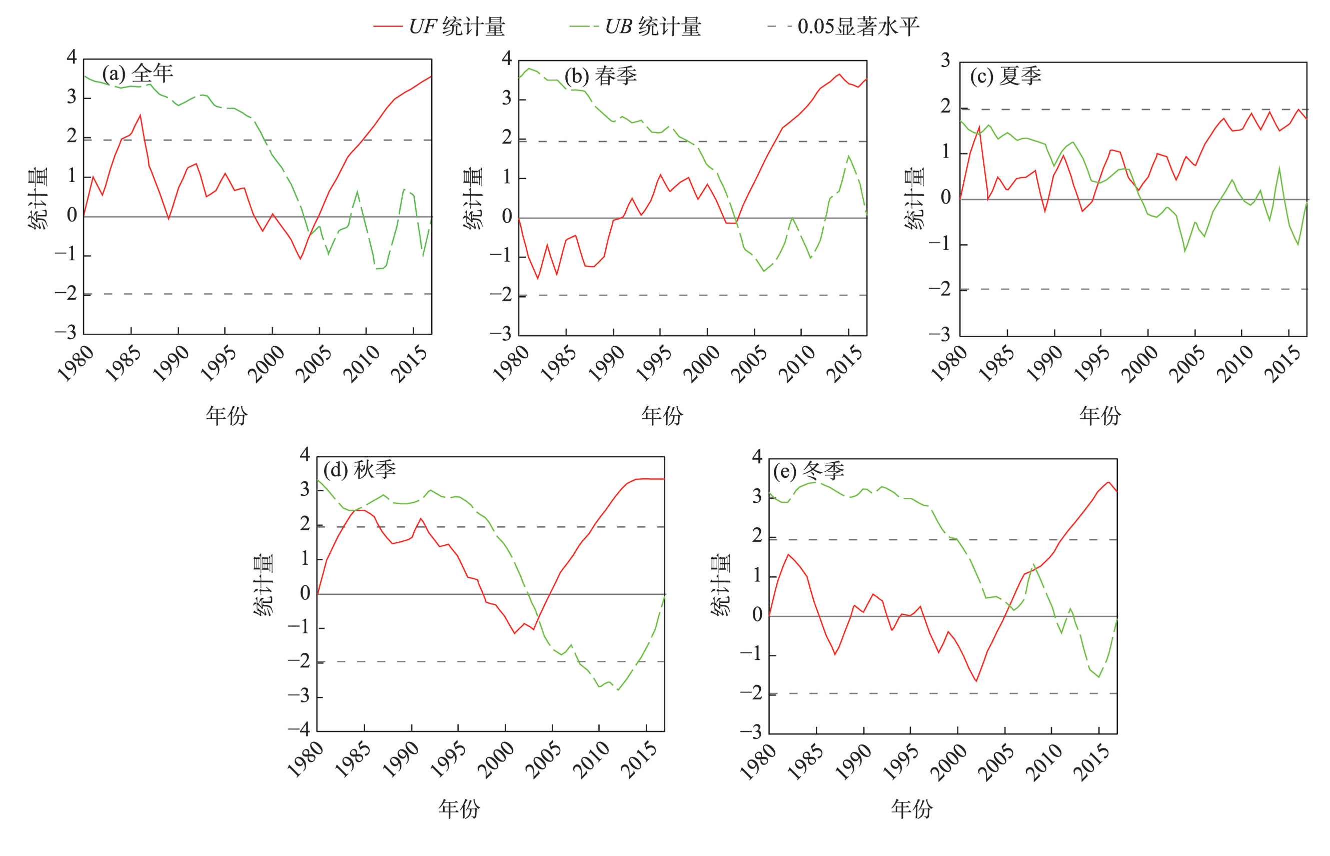


图4 青海省1980—2017年全年和季节地表感热通量年际变化M-K检验

Fig. 4 Mann-Kendall test curve of annual and seasonal average land surface sensible heat fluxes in Qinghai Province from 1980 to 2017

表3 EOF分析前三个模态载荷向量的方差贡献率与对应的累计方差贡献率

Tab. 3 Variance contribution rate and corresponding cumulative variance contribution rate of the first three modal load vectors from EOF analysis

EOF模态	第一模态	第二模态	第三模态
方差贡献率/%	41.92	13.59	6.62
累计方差贡献率/%	41.92	55.51	62.13

部站点明显多于东北部和西部的站点。结合时间系数,1980—1991年,青海省中南部站点处于负相位,感热通量呈上升趋势,东北部少数站点呈下降趋势,变化强度随时间减弱;从1991年开始,这种异常分布发生反相,即中南部站点感热通量呈下降趋势,东北部站点呈上升趋势;2004年该异常分布显著性最强,然后变化强度减小;直到2006年再次发生反相,中南部变为正异常,东北部变为负异常。

第三模态载荷向量(图5c)说明了青海省南北部站点感热通量以34°N为中心相反分布的特征。位于青海省南部的站点主要分布于34°N以南,95°E以东。结合时间系数,发现这种异常变化具有约10 a的周期。20世纪80年代中期到90年代中期以及2005—2012年左右与其他时间变化趋势相反。

2.5 青海省地表感热通量与其影响因子的相关分析

对青海省全年和各季节地表感热通量与其潜在气象影响因子进行同期的相关分析(表4)。春季和秋季感热通量与降水的相关性没有通过显著性检验,而全年、夏季和冬季感热通量均与降水有较显著相关性;夏季降水与感热通量呈显著负相关,通过了0.01的显著性检验。这是因为夏季降水增加,减少了日照时数,降低了对地表的短波辐射;同时降水增多改善了地表植被,改变了地表能量分配[25]。感热通量和地气温差在全年和各季节上均显著相关,且均通过了0.001的显著性检验。除夏季和冬季外,感热通量均与风速呈显著负相关,全年和春季感热通量分别通过了0.01和0.001水平的显著性检验。

出现该结果的原因是使用CHEN-WENG方案计算 C_H,忽视了大气稳定度、地表热力粗糙度等的影响。阳坤等[14]认为,风速降低既会直接增加传热

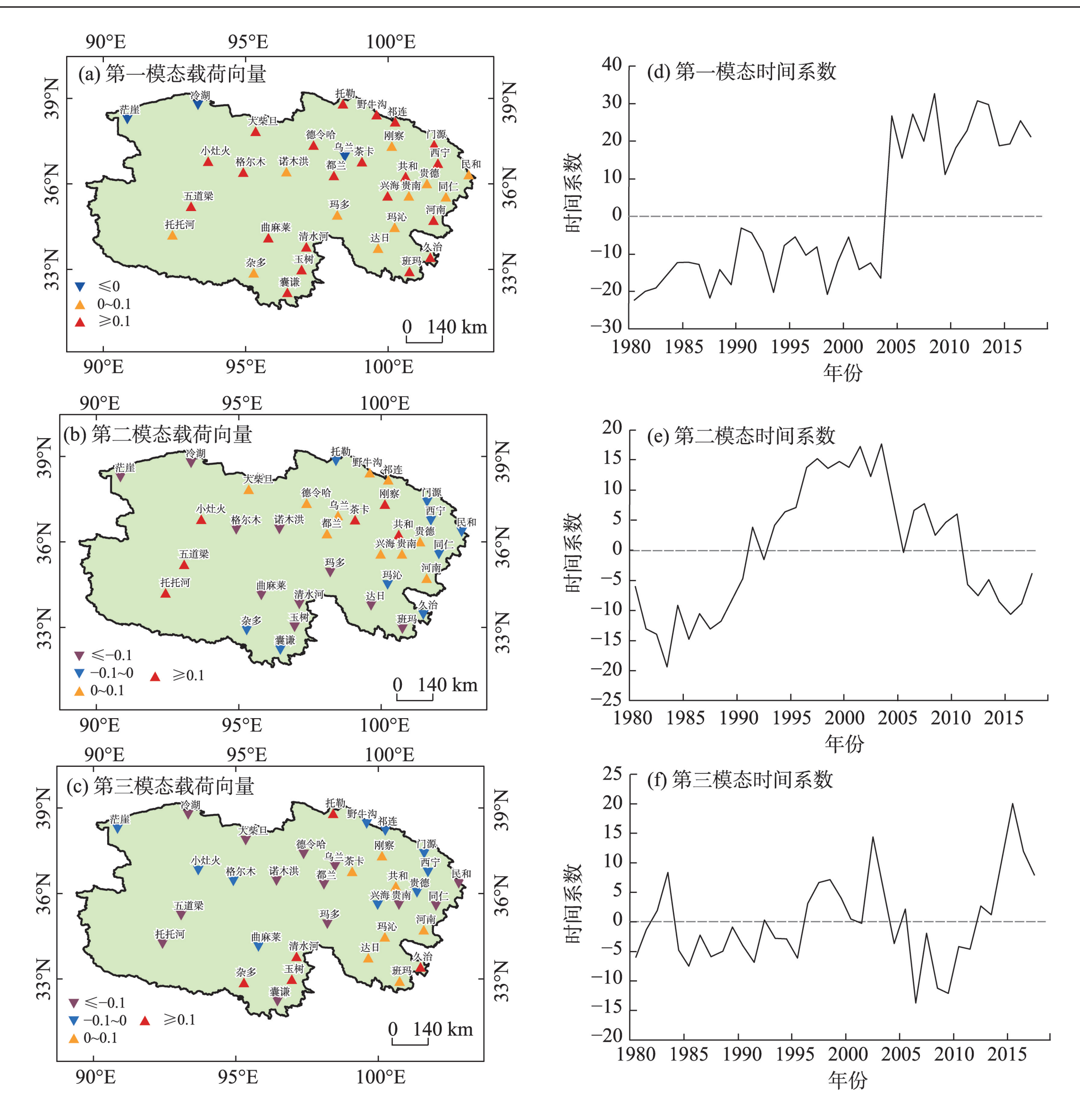


图5 青海省年均地表感热通量EOF分析前三个模态载荷向量及其对应时间系数

Fig. 5 The first three modal load vectors and corresponding time coefficients of the annual land surface sensible heat flux from EOF analysis in Qinghai Province

阻力，又与地气温差共同作用于大气稳定度，间接减小传热阻力，从而减缓了传热能力的变化。且CHEN-WENG方案极依赖风速，当风速减小，C_H会迅速增大[26]。此外，从春季和夏季到冬季，感热通量与降水、地气温差和风速的相关性呈下降趋势。感热通量的春夏季到秋季的较大差异与春季气温回升较快，地气温差加大；冬夏季风交汇，风速风向多变，以及春季地表粗糙度等影响下垫面性质的因素急剧变化等有关。

3 讨 论

由于公式(2)中C_H在本研究中仅依赖于风速，

表4 青海省1980—2017年全年和季节地表感热通量与其影响因子的相关分析

Tab. 4 Correlation analysis of annual and seasonal average land surface sensible heat fluxes and its influencing factors in Qinghai Province from 1980 to 2017

时间	降水	地气温差	风速
全年	0.283*	0.984***	-0.352**
春季	-0.161	0.971***	-0.476***
夏季	-0.346**	0.961***	-0.087
秋季	0.027	0.994***	-0.288*
冬季	0.280*	0.999***	-0.212

注:*、**、***分别表示通过0.05、0.01、0.001的显著性检验。

且其量级远小于地气温差和风速，对于长序列固定

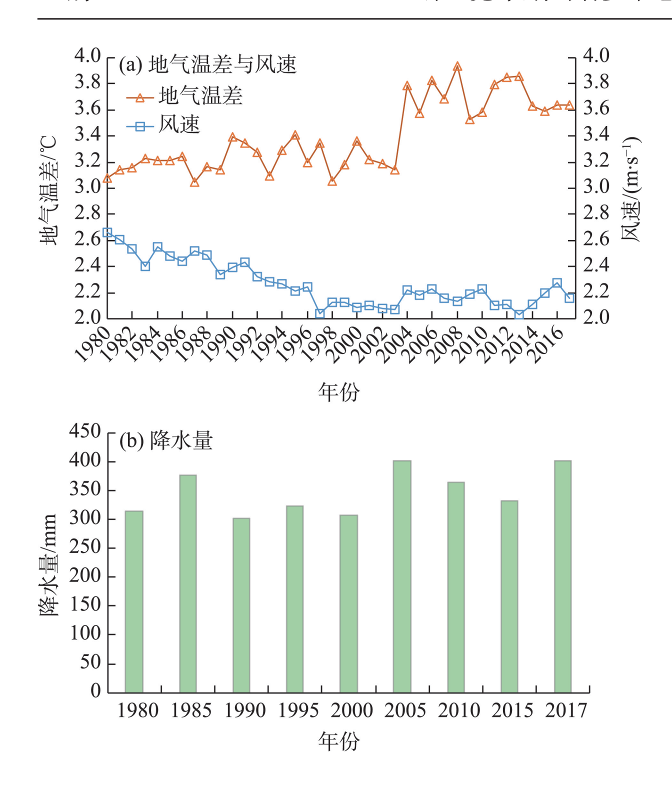


图6　青海省1980—2017年年均地气温差、年均风速和年均降水量的变化趋势

Fig. 6　Average annual ground-air temperature difference, average annual wind speed and average annual precipitation in Qinghai Province from 1980 to 2017

站点的研究,C_H对感热的影响可以忽略不计[27]。因此,地气温差、风速等气象要素会对青藏高原地表热量产生作用[28],是感热通量的重要影响因子。

由图4可知,青海省地表感热通量在2004年左右发生突变。因此,以2004年为界,将时间序列分为两段:1980—2003年,感热通量总体上呈下降趋势,在此期间风速下降约0.59 m·s^{-1},地气温差变化较小(图6a),风速是这一时期感热下降的主要原因[29];2004—2017年,感热通量呈上升趋势,这主要是因为地气温差明显增加以及风速减慢的速率降低[30]。同时,2005—2017年年均降水量(375.90 mm)相较于1980—2000年年均降水量(338.92 mm)有所增加(图6b),青藏高原整体上趋于变湿[25],这有利于增加土壤湿度,进而使青藏高原感热上升[31]。

为了进一步探究感热通量区域分异的影响因子,利用ArcGIS对35个站点的多年平均感热通量、地气温差、风速进行反距离权重插值(Inverse Distance Weighted,IDW),得到了以上三者的全年和季节变化的空间分布。采用基于莫兰指数(Moran's I)的表征空间相关性和异质性水平[32]的二元自相关程度测度模型双变量莫兰指数[33](Bivariate Moran's I)说明两个要素之间的空间正相关性。使用GeoDa计算全年和各季节平均感热通量与对应时段平均地气温差和平均风速的Bivariate Moran's I(表5,已删除未通过显著性检验的值),分析感热通量空间分异的驱动力。

各季节感热通量与对应季节地气温差的Bivariate Moran's I均大于0,说明感热通量与地气温差不是随机分布,而是具有显著的空间正相关性,即感热通量高(低)的地区,周围地区的地气温差也高(低),呈现出相似的空间布局态势(图7)。夏季这种态势更加明显。感热通量与风速的Bivariate Moran's I,只有春夏两季通过了显著性检验,即春夏两季的感热通量与风速具有相对一致的空间分布格局。

从地气温差的角度来看,由图8a可以得出,全年地气温差呈现出明显的西部高东部低的特点,最大值出现在青海省西南部的五道梁,中南部的玛多是一个高值点;东部和中北部地气温差较小,最小值出现在中北部的德令哈。春季地气温差(图8b)空间分布与春季感热通量(图7b)相符,在西北部的茫崖和冷湖出现高值点;春季地气温差相较于全年

表5　青海省不同季节地表感热通量与对应平均地气温差和风速双变量莫兰指数

Tab. 5　Bivariate Moran's I of seasonal average land surface sensible heat fluxes and corresponding average ground-air temperature difference and wind speed in Qinghai Province

	Bivariate Moran's I	P值	Z值
春季感热通量-春季地气温差	0.2513	0.01	3.0492
夏季感热通量-夏季地气温差	0.5429	0.001	6.4479
秋季感热通量-秋季地气温差	0.3547	0.001	4.0801
冬季感热通量-冬季地气温差	0.3648	0.001	4.2058
春季感热通量-春季风速	0.2163	0.01	2.9094
夏季感热通量-夏季风速	0.3353	0.001	4.7587

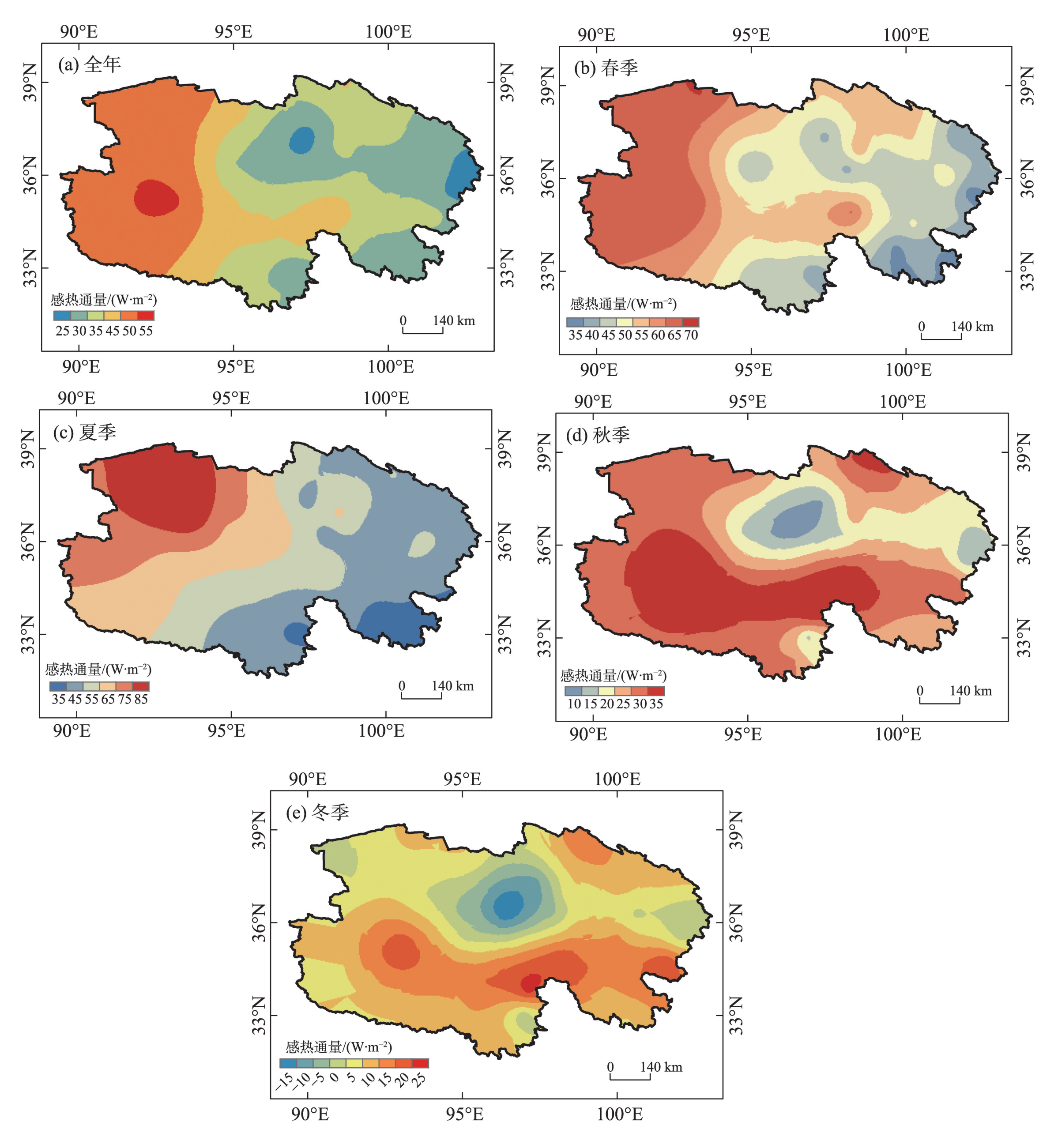


图7 青海省1980—2017年全年和季节地表感热通量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution map of annual and seasonal average land surface sensible heat fluxes in Qinghai Province from 1980 to 2017

显著增加,感热通量也增大。夏季地气温差(图8c)在西部特别是西北部和中北部显著增大,最大值点出现在小灶火;但是东部和中南部的地气温差有所减小,感热通量也呈下降。秋季地气温差(图8d)的绝对数值开始下降,北部下降的程度更剧烈,在空间分布上出现了明显的北低南高的特征,感热通量也随之从东西分异变为北部显著降低、南部存在高值点的南北分异模式。冬季地气温差(图8e)进一步下降,中北部出现负值,南部地气温差也有所下降;而感热通量南北分异的格局进一步得到强化,呈现出更加显著的南北差异。

从风速的角度,进一步研究感热通量的影响因子。图9a给出了青海省全年平均风速的空间分布状况,其与感热通量的全年空间分布特征相似,自西向东递减,呈现出西部高、中部有所下降而东部最低的分异格局。最大值点为五道梁,中部存在刚察、玛多和茶卡三个高值点,最小值出现在东南部的班玛。从春季来看(图9a),平均风速相较于全年有所增加,这也符合春季感热通量(图7b)上升的状况。总体上看,春季风速仍然是自西向东递减的分

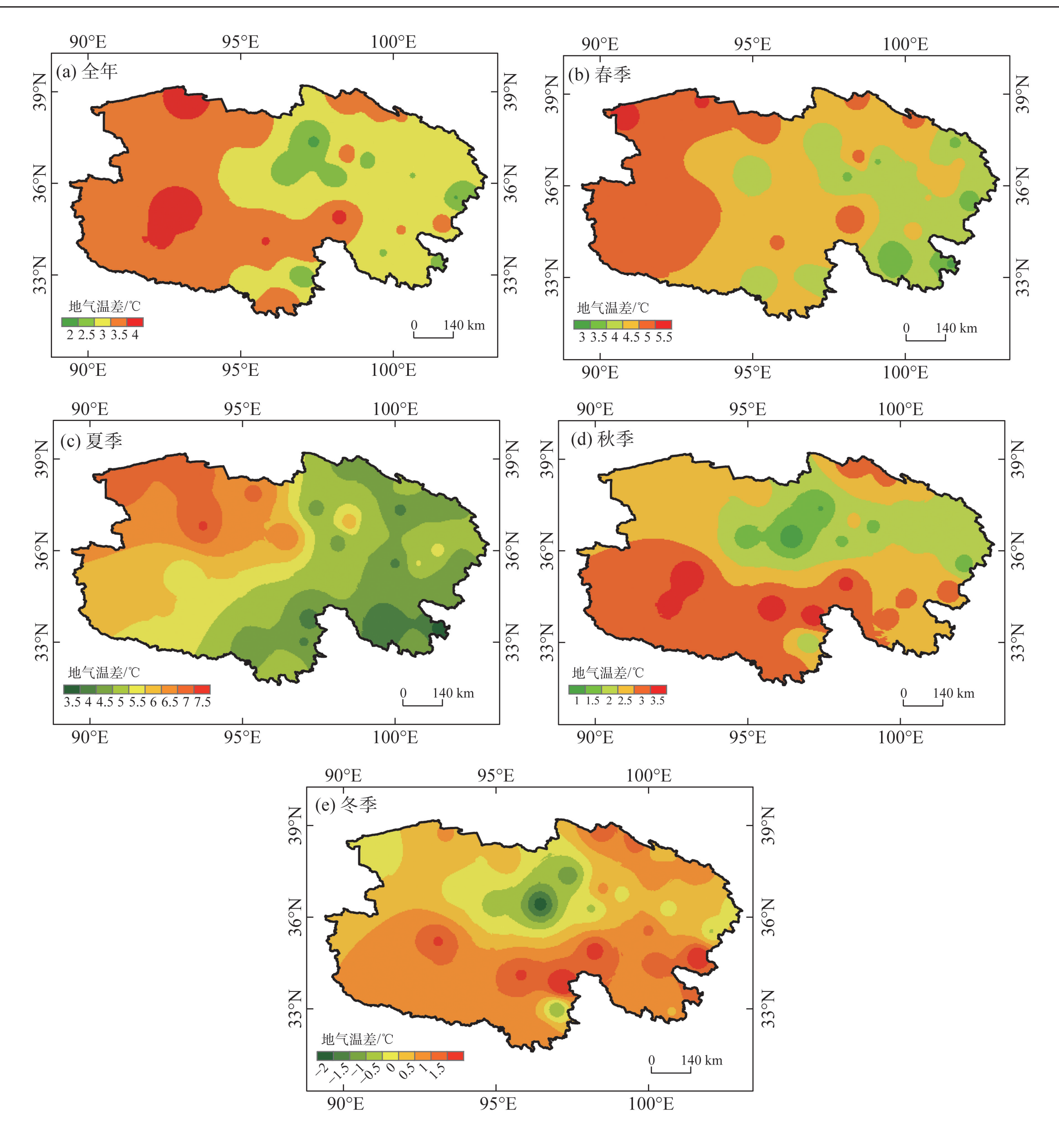


图8　青海省1980—2017年全年和季节多年平均地气温差空间分布

Fig. 8　Spatial distribution map of annual and seasonal average ground-air temperature difference in Qinghai Province from 1980 to 2017

布特点,与春季感热通量基本相符。夏季(图9c)平均风速相较于春季有所下降,最大值点向北移动出现在西北部的冷湖,中部和东部风速减小。其空间分异格局仍是西高东低,但一定程度上呈现出北高南低的特征。这与夏季感热通量的空间分布特征较为相似。

秋季(图9d),平均风速相较于夏季减小,风速最大值点南撤至西南部的五道梁,东北部存在一个高值点——刚察。但是,秋季平均风速的空间分布并没有出现像秋季感热通量那样显著的南高北低的分异格局。王慧等[34]的研究表明,青藏高原感热发生转折后,秋季感热受到风速与地气温差的共同影响。因此,在两者的作用下,秋季平均风速形成了与感热不同的空间分布状况。冬季(图9e),平均风速有所上升,在西南部的五道梁—托托河附近出现最大值;但西北部、中部和东部风速有所下降,呈现出显著的西南—东北分异格局。冬季感热通量的高值点同样也出现在五道梁处,但是呈现出中部高周边低的空间态势。这可能是因为冬季感热通量高值处主要分布于都兰—河南一线,海拔相对较

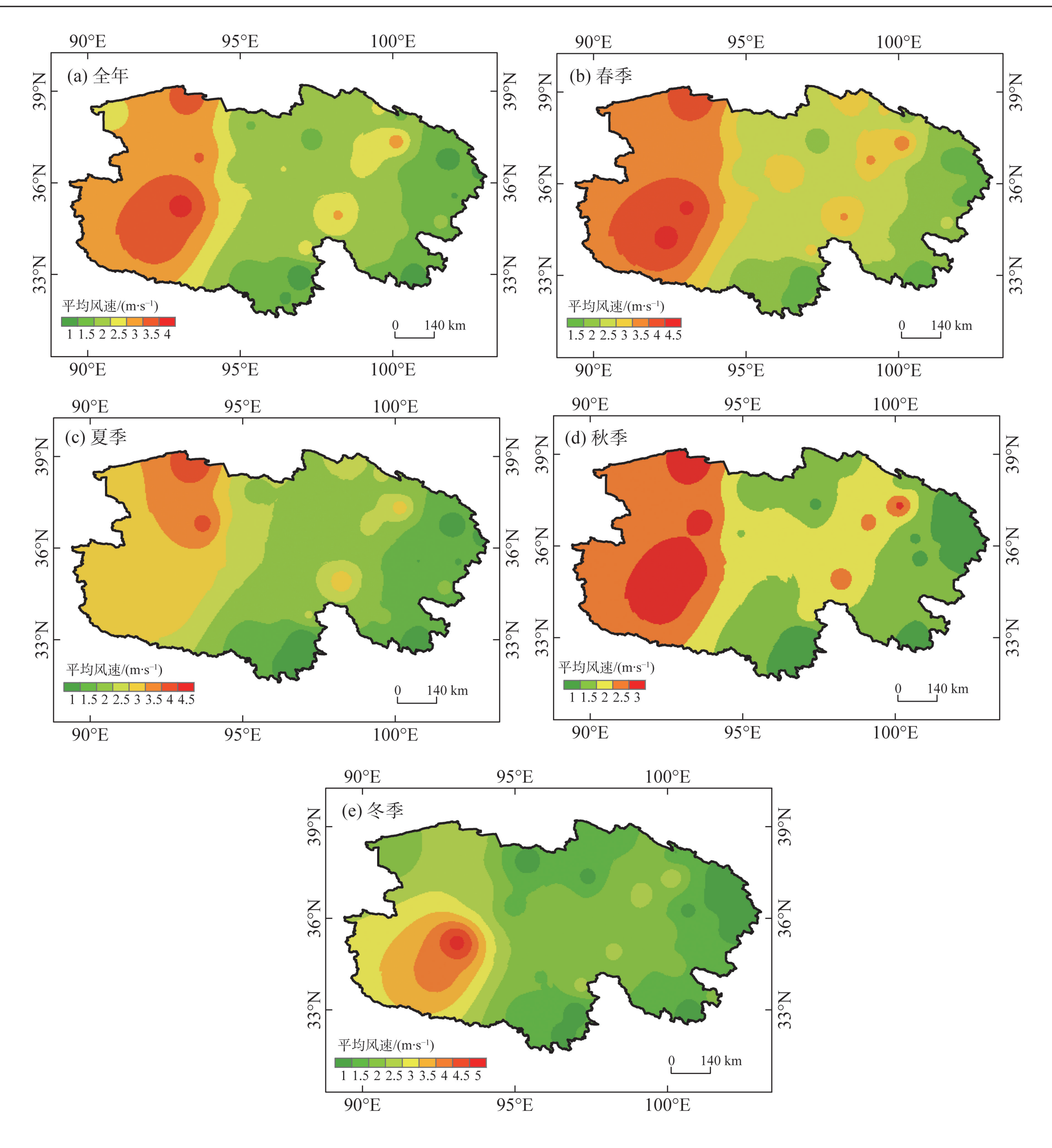


图9 青海省1980—2017年全年和季节多年平均风速空间分布

Fig. 9 Spatial distribution map of annual and seasonal average wind speed in Qinghai Province from 1980 to 2017

低,积雪融化较快,对地表的降温作用减弱,同时降低了地面反射率,进而加大了地气温差,形成了感热高值区[35]。

综上所述,青海省多年感热通量的空间分布与地气温差和风速的空间分布总体一致,说明地气温差和风速都是青海省地表感热通量的影响因子,其共同决定了感热通量的时空变化特征。但地气温差的相关性更高,是秋季和冬季感热通量的主要影响因子。除此之外,积雪、冻土退化、土壤温湿度以及高空西风急流等都会对感热通量产生影响[36-38]。

4 结 论

利用青海省CMA气象站点1980—2017年的常规气象资料,计算青海省地表感热通量的年以及季节平均值分析感热通量的时空变化特征和影响因子。

(1) 青海省全年地表感热通量在时间上呈现总体上升,局部先下降再上升的变化趋势;夏季感热通量上升程度小,其他季节感热通量上升较大。全年感热通量以及四季的变化周期均具有28 a的主周

期和12 a的副周期春季、夏季和冬季还存在18 a的副周期。青海省全年以及春季感热通量在空间上呈现出显著的东西分异,而在秋、冬季则表现出一定程度的南北分异。

(2) 青海省全年和各季节感热通量均与地气温差存在显著相关性;全年、春季和秋季感热通量均与风速存在显著相关性;夏季降水与感热通量呈显著负相关。各气象要素对感热通量的影响存在明显的时空差异,地气温差与风速是主要的影响因子。1980—2004年感热通量的下降与风速的减小有关;2004—2017年感热通量的上升主要是因为地气温差的增大及风速减慢的速率降低。

参考文献(References):

[1] 吴国雄, 刘屹岷, 何编, 等. 青藏高原感热气泵影响亚洲夏季风的机制[J]. 大气科学, 2018, 42(3): 488-504. [Wu Guoxiong, Liu Yimin, He Bian, et al. Review of the impact of the Tibetan Plateau sensible heat driven air-pump on the Asian summer monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(3): 488-504.]

[2] 徐祥德, 赵天良, 施晓晖, 等. 青藏高原热力强迫对中国东部降水和水汽输送的调制作用[J]. 气象学报, 2015, 73(1): 20-35. [Xu Xiangde, Zhao Tianliang, Shi Xiaohui, et al. A study of the role Tibetan Plateau's thermal forcing in modulating rainband and moisture transport in eastern China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(1): 20-35.]

[3] 胡媛媛, 仲雷, 马耀明, 等. 青藏高原典型下垫面地表能量通量的模型估算与验证[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1499-1510. [Hu Yuanyuan, Zhong Lei, Ma Yaoming, et al. Model estimation and validation of the surface energy fluxes at typical underlying surfaces over the Qinghai- Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(6): 1499-1510.]

[4] Yang K, Guo X F, He J, et al. On the climatology and trend of the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau: An experiments-supported revisit[J]. Journal of Climate, 2011, 24(5): 1525-1541.

[5] Zhang H X, Li W P, Li W J. Influence of late springtime surface sensible heat flux anomalies over the Tibetan and Iranian Plateaus on the location of the South Asian high in early summer[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(1): 93-103.

[6] 祁艳, 颜玉倩, 李金海, 等. 青藏高原5—10月地表潜热通量与青海同期降水之间的关系[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 529-536. [Qi Yan, Yan Yuqian, Li Jinhai, et al. Relationship between surface latent heat flux over the Qinghai-Tibetan Plateau and precipitation in Qinghai from May to October[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 529-536.]

[7] 王欢, 李栋梁. 21世纪初青藏高原感热年代际增强对中国东部季风雨带关键区夏季降水年代际转折的影响[J]. 地球物理学报, 2020, 63(2): 412-426. [Wang Huan, Li Dongliang. Impacts of decadal variability in sensible heat over the Tibetan Plateau on decadal transition of summer precipitation over dominant regions of monsoon rainfall band in eastern China since the early 2000s [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(2): 412-426.]

[8] 葛静, 王黎娟, 张良瑜. 春末夏初南亚高压活动与青藏高原及周边热力强迫的关系[J]. 大气科学学报, 2015, 38(5): 611-619. [Ge Jing, Wang Lijuan, Zhang Liangyu. Relationship between South Asian high activity and thermal forcing over Tibetan Plateau and surrounding regions during late spring and early summer[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2015, 38(5): 611-619.]

[9] Monin A S, Obukhov A M. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere[J]. Trudy Akademiia, 1954, 24(151): 163-187.

[10] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 329-337. [Ye Duzheng, Gao Youxi. The Meteorology of the Qinghai-Xizang Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1979: 329-337.]

[11] 陈万隆, 翁笃鸣. 关于青藏高原感热和潜热旬总量计算方法的初步研究[C]//青藏高原气象科学实验论文集(二). 北京: 科学出版社, 1984, 35-45. [Chen Wanlong, Wong Duming. A preliminary study on the computational method of 10-day mean sensible heat and latent heat on the Tibetan Plateau[C]//Collected works of the Qinghai-Xizang Plateau Meteorological Experiment (Series 2). Beijing: Science Press, 1984, 35-45.]

[12] Yang K, Qin J, Guo X F, et al. Method development for estimating sensible heat flux over the Tibetan Plateau from CMA Data[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2009, 48(12): 2474-2486.

[13] Cressman G P. Improved terrain effects in barotropic forecasts[J]. Monthly Weather Review, 1960, 88(9): 327-342.

[14] 阳坤, 郭晓峰, 武炳义. 青藏高原地表感热通量的近期变化趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(7): 923-932. [Yang Kun, Guo Xiaofeng, Wu Bingyi. Recent trends in surface sensible heat flux on the Tibetan Plateau[J]. Science China: Earth Science, 2010, 40 (7): 923-932.]

[15] 竺夏英, 刘屹岷, 吴国雄. 夏季青藏高原多种地表感热通量资料的评估[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(7): 1104-1112. [Zhu Xiaying, Liu Yimin, Wu Guoxiong. An assessment of summer sensible heat flux on the Tibetan Plateau from eight data sets[J]. Science China: Earth Science, 2012, 42(7): 1104-1112.]

[16] Guo X, Yang K, Chen Y. Weakening sensible heat source over the Tibetan Plateau revisited: Effects of the land-atmosphere thermal coupling[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 104(1-2): 1-12.

[17] Zhu L H, Huang G, Fan G Z, et al. Evolution of surface sensible heat over the Tibetan Plateau under the recent global warming hiatus[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(10): 1249-1262.

[18] 张扬, 楚新正, 杨少敏, 等. 近56 a新疆北部地区气候变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 212-219. [Zhang Yang, Chu Xin-

zheng, Yang Shaomin, at al. Climate change in North Xinjiang in recent 56 years[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 212-219.]

[19] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展, 2013, 32(9): 1413-1422. [Sang Yanfang, Wang Zhonggen, Liu Changming. Applications of wavelet analysis to hydrology: Status and prospects[J]. Progress in Geography, 2013, 32(9): 1413-1422.]

[20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Techniques[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]

[21] 赵峰, 毕硕本, 李兴宇, 等. 基于EOF和REOF的1470—1911年黄河中下游地区旱涝空间分布特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 799-809. [Zhao Feng, Bi Shuoben, Li Xingyu, et al. Spatial characteristics of drought/flood disasters based on EOF and REOF in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911 [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 799-809.]

[22] 雷润芝, 余晔, 周国兵, 等. 1984—2020年青藏高原感热通量长期变化趋势分析[J]. 高原气象, 2023, 42(4): 833-847. [Lei Runzhi, Yu Ye, Zhou Guobing, et al. Long-term variation of sensible heat flux over the Qinghai-Xizang Plateau from 1984 to 2020[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(4): 833-847.]

[23] Wang Huan, Li Dongliang. Decadal variability in summer precipitation over eastern China and its response to sensible heat over the Tibetan Plateau since the early 2000s[J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(3): 1604-1617.

[24] Wang M R, Wang J, Chen D L, et al. Recent recovery of the boreal spring sensible heating over the Tibetan Plateau will continue in CMIP6 future projections[J]. Environment Research Letter, 2019, 14(12): 124066.

[25] 解晋, 余晔, 刘川, 等. 青藏高原地表感热通量变化特征及其对气候变化的响应[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 28-42. [Xie Jin, Yu Ye, Liu Chuan, et al. Characteristics of surface sensible heat flux over the Qinghai-Tibetan Plateau and its response to climate change[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(1): 28-42.]

[26] 于威, 刘屹岷, 杨修群, 等. 青藏高原不同海拔地表感热的年际和年代际变化特征及其成因分析[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1161-1176. [Yu Wei, Liu Yimin, Yang Xiuqun, et al. The interannual and decadal variation characteristics of the surface sensible heating at different elevations over the Qinghai-Tibetan Plateau and attribution analysis[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(5): 1161-1176.]

[27] Duan A M, Wu G X. Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during recent decades. Part I: observations[J]. Journal of Climate, 2008, 21(13): 3149-3164.

[28] Zhou L T, Huang R H. Regional differences in surface sensible and latent heat fluxes in China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116(3/4): 625-637.

[29] Yang K, Wu H, Qin J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review [J]. Global and Planetary Change, 2014, 112(1): 79-91.

[30] 戴逸飞, 王慧, 李栋梁. 卫星遥感结合气象资料计算的青藏高原地面感热特征分析[J]. 大气科学, 2016, 40(5): 1009-1021. [Dai Yifei, Wang Hui, Li Dongliang. Characteristics of surface sensible heat flux calculated from satellite remote sensing and field observations in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(5): 1009-1021.]

[31] Chen X, Su Z, Ma Y, et al. Development of a 10-year (2001-2010) 0.1° data set of land-surface energy balance for mainland China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(23): 13097-13117.

[32] Anselin L, Syabri I, Kho Y. GeoDa: An introduction to spatial data analysis[J]. Geographical Analysis, 2006, 38(1): 5-22.

[33] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.

[34] 王慧, 张璐, 石兴东, 等. 青藏高原中东部地表感热趋势转折特征的季节差异[J]. 大气科学, 2022, 46(1): 133-150. [Wang Hui, Zhang Lu, Shi Xingdong, et al. Seasonal differences in the trend turning characteristics of surface sensible heat over the central and eastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(1): 133-150.]

[35] Flanner M G, Shell K M, Barlage M, et al. Radiative forcing and albedo feedback from the northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(3): 151-155.

[36] Duan A M, Li F, Wang M R, et al. Persistent weakening trend in the spring sensible heat source over the Tibetan Plateau and its impact on the Asian summer monsoon[J]. Journal of Climate, 2011, 24(21): 5671-5682.

[37] You Q L, Fraedrich K, Min J Z, et al. Observed surface wind speed in the Tibetan Plateau since 1980 and its physical causes[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(6): 1873-1882.

[38] 姚慧茹, 李栋梁. 1971—2012年青藏高原春季风速的年际变化及对气候变暖的响应[J]. 气象学报, 2016, 74(1): 60-75. [Yao Huiru, Li Dongliang. The interannual variation of wind speed in the Tibetan Plateau in spring and its response to global warming during 1971-2012[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74(1): 60-75.]

Temporal and spatial variations in multi-year surface sensible heat flux in Qinghai Province

SUN Kuan[1], SUN Xueyan[2], TANG Yan[1], ZHANG Yaling[3], LIU Fugang[1], FAN Kesheng[1], YANG Ziqiong[2], QU Zhiqiang[2]

(1. School of Ecology Resources and Environment, Dezhou University, Dezhou 253023, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Grassland Resources (IMAU), Ministry of Education, College of Grassland, Resource and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China; 3. China Water Resources Beifang Investigation, Design & Research Co. Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Based on the Chen-Weng heat exchange parameterized scheme, the average sensible heat flux from 1980 to 2017 in Qinghai Province was calculated using the observation data collected from 35 stations. Temporal and spatial characteristics of the sensible heat fluxes and their impact factors in Qinghai Province were determined using wavelet analysis, Mann-Kendall test, and Empirical Orthogonal Function. The result shows that the seasonal and annual average sensible heat fluxes have risen since 1980. The primary cycle of the annual average sensible heat flux was 28 a, and the secondary cycle was about 18 a. A high correlation between the seasonal and yearly average sensible heat flux with average ground-air temperature difference manifested. The annual average sensible heat flux increased from 2004 to 2017 due to a rise in the average ground-air temperature differences. The correlation of average wind speed with annual, spring, and autumn average sensible heat fluxes was high. The average yearly sensible heat flux decreased from 1980 to 2004 due to a decline in average wind speed. A prominent negative correlation between summer precipitation and sensible heat flux was identified. From the perspective of space, spring and annual average sensible heat fluxes expressed a prominent east-west difference and partly indicated a north-south variation in the autumn and winter.

Keywords: sensible heat flux; Empirical Orthogonal Function; Mann-Kendall test; wavelet analysis; Qinghai Province